

网络控制论概论

卢昱 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

本书得到总装备部“1153”人才工程专项经费资助

网络控制论概论

卢昱 吴忠望 王宇 卢鋈 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

网络控制论概论/卢昱等著. —北京: 国防工业出版社,
2005.9

ISBN 7-118-04119-X

I. 网... II. 卢... III. 计算机网络—自动控制—
概论 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 096519 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 11 284 千字

2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 28.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行传真: (010)68411535

发行邮购: (010)68414474

发行业务: (010)68472764

前 言

信息社会最大的特征就是计算机网络无处不在,各行各业及人们的日常工作、生活都依赖于网络,都离不开网络。然而网络的开放性却给网络的安全与管理带来巨大的困难,给网络上传输、存储的信息的安全保密带来巨大的威胁。研究人员研制了各种各样的系统和设备来堵塞这些漏洞,保证系统及信息的安全,但目前所取得的这些研究成果都是根据某些特殊的环境和设备研制的,都是仅解决了某个环节的问题。而对于网络管理过程中带有一般性和普遍意义的研究还很缺乏,对网络系统设计的好坏、安全及管理性能的评价还缺少科学严谨的评价理论和方法。

控制论是研究各种系统中调节和控制过程的普遍理论,是对系统的普遍性和规律性进行科学研究、客观评价的有效方法。因此,可以用控制论的理论和方法来分析、评价和设计各种计算机网络及其管理系统;网络控制论是关于网络系统中调节与控制过程的普遍理论。对此可从以下几个方面来认识。首先,网络控制论是从更加完备和综合的角度来认识网络系统这一整体的。它明确提出网络系统的结构、功能、行为这样一些网络系统的基本属性,并将他们作为描述网络系统的基点。在一定程度上可以说,以往对网络系统的研究只是以网络系统中某一方面作为主要研究对象,并以此为出发点延伸、展开相应理论体系和应用研究。其次,网络控制论将首先开创和奠定网络系统中调节与控制过程普遍理论的基础。网络控制论以其对网络系统这一客体的更加全面的认识为起点,以控制论和人工智能技术为基础,吸取其他相关的特殊网络系统的调节和控制经验,并加以升华和拓广,使得网络系统中调节和控制过程的普遍理论有了坚实的基础。再次,网络控制论

把网络系统这个客观对象与其本身的主观能动性(对网络活动的调节和控制)有机地结合在一起。网络控制论一方面将不同的主观倾向性包含于调节和控制的问题之中,另一方面,它又可以将客观评价溶于调节和控制的问题之中。最后,网络控制论将对网络系统的功能特性(如可控性、可观性、能通性和能达性)给出一整套的概念和分析方法,从而把网络安全和管理活动定性分析的水平提高到一个新的高度,并能在此基础上进行定量分析。

本书共分 10 章,在第 1 章绪论中介绍了网络控制论的形成与产生、讨论了网络控制论的概念、研究对象、研究内容和研究方法。

在第 2 章网络控制论系统中讨论了网络和网络系统、控制和控制论系统以及网络控制论系统体系结构,重点论述了网络控制论系统的概念、结构、类型和特性,提出了网络控制论系统体系结构,论述了它的基本参考模型、控制策略、控制机制和控制服务。

在第 3 章网络控制中提出了网络控制的概念,介绍了网络控制的基本原理和控制方式,重点分析了分级控制、最优控制、智能控制和协同控制,并相应地分析了网络控制的三种基本结构及它们的控制结构变形,讨论了网络控制过程。

在第 4 章网络控制论系统的结构描述与分析中介绍了网络时空坐标系的数学描述方法,从信息通道拓扑结构和结构阵逻辑算法等方面对网络控制论系统的结构进行描述,从可观性、可控性、能达性等方面对网络控制论系统进行了结构分析,并从结构脆弱性、通信效率和结构动力学等方面对网络控制论系统进行了结构统计学分析。

在第 5 章网络控制论系统的行为描述与分析中介绍了网络行为的概念及其分类,提出了网络行为的描述要素,分析了网络行为特征,讨论了网络行为观测、建模、仿真和预测方法。

在第 6 章网络控制论分析方法中从网络控制论系统分析的内容、步骤和方法方面讨论了网络控制论系统分析方法。然后介绍了网络控制论系统模型的分类,在此基础之上,提出了多层多重重点模型体系,又从建模的一般步骤和建模的方法方面进行网络控

制论的建模分析。同时介绍了网络控制论仿真分析方法。

在第7章网络安全控制中,在阐述了网络安全控制的概念内涵的基础上,提出了网络安全控制体系结构,介绍了安全控制的原理、功能、策略和机制,提出了网络安全控制系统的概念及其多极控制实现结构。

在第8章网络攻防控制中,在阐述网络攻防控制内涵的基础上,介绍了网络攻防控制的基本原理和参考模型,分别讨论了网络攻击控制和网络防御控制。

在第9章空间信息网络控制中,在介绍了空间信息网络的概念与特点的基础上,提出了空间信息网络结构描述与分析的方法,对空间信息网络拓扑结构进行了图论描述和静态描述,从拓扑结构构型、能通性、重构性和最短路径等方面分析了空间信息网络结构,介绍了空间信息网络的结构控制、接入控制、传输控制和访问控制,并进行了性能分析和仿真分析。

在第10章网络控制论系统的控制效能评估中给出了网络控制论系统评估的一般方法和过程,并以C³I系统受控性评估为例进行了具体评估。

从现代控制理论的观点和网络技术的发展来看,网络控制论将是控制论分化下的一门崭新学科,也将是下一代网络安全与管理技术研究的先进领域。从系统论、控制论和信息理论的角度审视目前的网络控制与安全技术,它们似乎更强调技术在产品中的体现,强调管理对产品使用的控制,都没有从系统和控制的观点审视和构建网络安全体系。本书针对控制理论和网络技术进一步发展的需要,提出网络控制论,为解决日益严峻的网络安全和管理问题提供新的途径,为计算机网络系统的分析、综合和模型化提供新的方法。全书充分考虑了内容组织的系统性和完整性,特别突出了网络控制论理论框架的完整性,可用作从事网络信息安全技术的科研人员和相关行业技术人员的参考书,同时还可作为计算机网络信息安全专业或相近专业研究生的教科书。

卢昱确定了全书结构、大纲,并撰写了各章节主要内容;吴忠

望、卢璠、王宇、杨健康参与了部分章节内容的撰写;全书由卢昱统稿并最后定稿;朱涛江、顾丽娜、张练达等同志也为本书的完成做出了贡献。

本书得到总装备部“1153”人才工程专项经费资助,是我国第一部系统阐述网络控制论的理论专著。由于网络控制论涉及的内容技术新、范围广、资料少,对网络控制论研究的难度非常大,有些研究还不够深入,特别是对受控网络系统安全体系结构的分析和效能评估尚处于探讨阶段,因此本书的错误和不足之处在所难免,恳请广大作者和专家批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 网络控制论的提出	1
1.1.1 控制论的发展	1
1.1.2 控制论与网络系统的结合	3
1.2 网络控制论的内涵	4
1.3 网络控制论的研究对象	7
1.4 网络控制论的研究内容	15
第 2 章 网络控制论系统	18
2.1 网络和网络系统	18
2.1.1 基本概念	18
2.1.2 网络系统的特性	20
2.1.3 网络系统的输入和输出	21
2.2 控制和控制论系统	29
2.2.1 控制	29
2.2.2 控制论	31
2.2.3 控制论系统	32
2.3 网络控制论系统	36
2.3.1 网络控制论系统的概念	36
2.3.2 网络控制论系统的基本结构	39
2.3.3 网络控制论系统的类型	39
2.3.4 网络控制论系统的特性	41
2.4 网络控制论系统的体系结构	43
2.4.1 定义	43

2.4.2	参考模型	45
2.4.3	控制策略	53
2.4.4	控制机制	55
2.4.5	控制服务	59
第 3 章	网络控制	62
3.1	网络控制的概念与管理局限	62
3.1.1	网络控制的概念	63
3.1.2	网络管理的局限	63
3.1.3	网络控制与网络管理	65
3.2	网络控制原理	67
3.2.1	基本原理	67
3.2.2	反馈原理	68
3.2.3	决策分析	70
3.3	网络控制方式	72
3.3.1	基本方式	72
3.3.2	分级控制	73
3.3.3	协同控制	74
3.3.4	最优控制	76
3.4	网络控制结构	77
3.4.1	基本控制结构	77
3.4.2	网络控制结构的特点	87
3.4.3	控制结构变型	89
3.5	网络控制过程	92
3.5.1	基本控制过程	92
3.5.2	控制过程设计	94
3.5.3	网络控制举例	101
第 4 章	网络控制论系统的结构描述与分析	105
4.1	网络时空坐标系的数学描述	105
4.1.1	网络控制论的数学基础	105

4.1.2	网络时间和网络空间	105
4.1.3	网络控制论系统在网络时空坐标系的数学描述	107
4.2	网络控制论系统的结构描述	109
4.2.1	信息通道的拓扑结构特性描述	109
4.2.2	结构阵逻辑算法	115
4.3	网络控制论系统的结构分析	117
4.3.1	可观性分析	117
4.3.2	可控性分析	121
4.3.3	可达性分析	124
4.3.4	结构统计学分析	128
第 5 章	网络控制论系统的行为描述与分析	134
5.1	网络行为的概念	135
5.2	网络行为的分类	136
5.2.1	内部行为和外部行为	137
5.2.2	基本行为、攻击行为和防御行为	140
5.2.3	局部行为和群体行为	141
5.2.4	物理实体行为和逻辑实体行为	143
5.2.5	父行为和子行为	144
5.2.6	动态行为和静态行为	144
5.3	网络行为的描述	145
5.3.1	网络行为的描述要素	146
5.3.2	网络行为特性	147
5.4	网络行为分析方法	152
5.4.1	网络行为观测	153
5.4.2	网络行为建模	155
5.4.3	网络行为仿真	157
5.4.4	网络行为预测	158
5.5	网络行为建模仿真举例	159
第 6 章	网络控制论分析方法	162
6.1	系统分析方法	162

6.1.1	网络控制论系统分析	163
6.1.2	网络控制论系统分析的内容	165
6.1.3	网络控制论系统分析的步骤	168
6.1.4	网络控制论系统分析的方法	170
6.2	建模分析方法	173
6.2.1	网络控制论建模分析	173
6.2.2	网络控制论的模型体系	175
6.2.3	网络控制论建模的步骤	178
6.2.4	网络控制论建模的方法	180
6.2.5	网络控制论系统模型举例	182
6.3	仿真分析方法	188
6.3.1	网络控制论仿真分析	190
6.3.2	网络控制论仿真分析的内容	192
6.3.3	网络控制论仿真分析的步骤	194
6.3.4	网络控制论仿真分析的方法	195
6.3.5	网络控制论系统的实体仿真建模举例	197
第7章	网络安全控制	201
7.1	网络安全控制的内涵	201
7.1.1	网络安全控制的需求	202
7.1.2	网络安全控制的概念	204
7.1.3	网络安全控制的重要性	204
7.2	网络安全控制体系结构	205
7.2.1	网络安全控制原理	205
7.2.2	网络安全控制功能	207
7.2.3	网络安全控制策略和机制	210
7.3	网络安全控制系统	215
7.3.1	网络安全控制系统的概念	215
7.3.2	网络安全控制系统的设计原则	217
7.4	网络安全控制系统的多级控制结构	218
7.4.1	网络控制中心	220

7.4.2	中间控制节点	222
7.4.3	信息采集节点	224
7.4.4	控制客户端	225
7.4.5	多级控制的工作过程和信息流程	225
第 8 章	网络攻防控制	228
8.1	网络攻防控制的内涵	228
8.2	网络攻防控制体系结构	229
8.2.1	网络攻防控制原理	229
8.2.2	网络攻防控制模型	232
8.3	网络防御控制	240
8.3.1	网络防御控制的必要性	240
8.3.2	网络防御控制结构	241
8.3.3	网络防御控制举例	249
8.4	网络攻击控制	251
8.4.1	网络攻击控制的一般步骤	251
8.4.2	网络攻击控制结构	251
第 9 章	空间信息网络控制	257
9.1	空间信息网络概述	257
9.1.1	空间信息网络的概念	257
9.1.2	空间信息网络的组成	258
9.1.3	空间信息网络的特点	260
9.2	空间信息网络拓扑结构描述与分析	263
9.2.1	空间信息网络结构描述与分析方法	264
9.2.2	空间信息网络拓扑结构描述	266
9.2.3	空间信息网络结构分析	270
9.3	空间信息网络控制	276
9.3.1	空间信息网络的结构控制	276
9.3.2	空间信息网络的接入控制	277
9.3.3	空间信息网络的传输控制	277

9.3.4 空间信息网络的访问控制	279
9.4 空间信息网络的性能分析	282
9.4.1 网络结构的可靠性分析	282
9.4.2 网络结构的抗毁性分析	287
9.5 空间信息网络的仿真分析	289
9.5.1 仿真系统的组成	290
9.5.2 仿真成员设计	291
第 10 章 网络控制论系统的控制效能评估	299
10.1 控制效能评估	299
10.1.1 评估环境	300
10.1.2 基本原则	300
10.2 评估方法	301
10.2.1 静态评估	302
10.2.2 动态评估	302
10.2.3 定性评估	304
10.2.4 定量评估	305
10.2.5 解析法	307
10.2.6 统计法	307
10.2.7 计算机仿真	307
10.3 评估过程	308
10.3.1 一般评估过程	308
10.3.2 网络控制效能的评估周期	309
10.3.3 网络控制效能的评估过程	310
10.4 网络控制效能评估指标体系	312
10.4.1 受控性	315
10.4.2 可靠性	316
10.4.3 抗毁性	319
10.4.4 连通性	321
10.4.5 安全性	322
10.4.6 固有能力和费效比	323

10.5 网络控制论系统的控制效能评估举例	324
10.5.1 C^3I 系统的控制论特性	324
10.5.2 C^3I 系统的受控性评估指标体系	326
10.5.3 C^3I 系统的受控性评估过程	328
参考文献	332

第 1 章 绪 论

如果一门新的科学学科是真正有生命力的,它的引人入胜的中心就必须而且应该随着岁月而转移……因此控制论学家应该继续走向新的领域,应该把他的大部分注意力转移到近十年发展的新兴思想上去。

——控制论的奠基者 诺伯特·维纳(Norbert Wiener)

1.1 网络控制论的提出

1.1.1 控制论的发展

控制论创始人维纳在他的《控制论》一书的副标题上标明,控制论是“关于在动物和机器中控制和通信的科学”。

控制论是多门科学综合的产物,也是许多科学家共同合作的结晶。控制论(Cybernetics)一词来自希腊语,原意为掌舵术,包含了调节、操纵、管理、指挥、监督等多方面的含义,维纳以它作为自己创立的一门新学科的名称,正是取它能够避免过分偏于哪一方面而“不能符合这个领域的未来发展”的意思,也是“纪念关于反馈机构的第一篇重要论文”。1948年维纳的《控制论》出版,宣告了这门科学的诞生。

控制论诞生后,得到了广泛应用并迅猛发展,大致经历了三个发展时期。

第一个时期为 20 世纪 50 年代经典控制论时期。这个时期的代表著作为我国著名科学家钱学森 1954 年在美国发表的《工程控制论》。

第二个时期为 20 世纪 60 年代现代控制论时期。导弹系统、人造卫星、生物系统研究的发展,使控制论的重点从单变量控制向多变量控制,从自动调节向最优控制,从线性系统向非线性系统转变。美国卡尔曼提出的状态空间方法以及其他学者提出的极大值原理和动态规划等方法,形成了系统测辨、最优控制、自组织自适应系统等现代控制理论。

第三时期为 20 世纪 70 年代后的大系统理论时期。控制论由工程控制论、生物控制论向经济控制论、社会控制论发展:1975 年国际控制论和系统论第三届会议,讨论的主题就是经济控制论的问题;1978 年的第四届会议,主题又转向了社会控制论。电子计算机的广泛应用和人工智能研究的开展,使控制系统显现出规模庞大,结构复杂,因素众多,功能综合的特点,从而控制论也向大系统理论发展。

控制论是研究各类系统的调节和控制规律的科学,它是自动控制、通信技术、计算机科学、数理逻辑、神经生理学、统计力学、行为科学等多种科学技术相互渗透形成的一门横断性学科。它研究生物体和机器以及各种不同基质系统的通信和控制的过程,探讨它们共同具有的信息交换、反馈调节、自组织、自适应的原理和改善系统行为、使系统稳定运行的机制,从而形成了一套适用于各门科学的概念、模型、原理和方法。

控制论的研究表明,无论是自动机器,还是神经系统、生命系统,以至经济系统、社会系统,撇开各自的质态特点,都可以看作是一个自动控制系统。在这类系统中有专门的调节装置来控制系统的运转,维持自身的稳定和系统的目的功能。控制机构发出指令,作为控制信息传递到系统的各个部分(即控制对象)中去,它们按指令执行之后再把执行的情况作为反馈信息输送回来,并作为决定下一步调整控制的依据。这样我们就看到,整个控制过程就是一个信息流通过的过程,控制就是通过信息的传输、变换、加工、处理来实现的。反馈对系统的控制和稳定起着决定性的作用,无论是生物体保持自身的动态平稳(如温度、血压的稳定),或是机器自动

保持自身功能的稳定,都是通过反馈机制实现的,反馈是控制论的核心问题。控制论就是研究如何利用控制器,通过信息的变换和反馈作用,使系统能自动按照人们预定的程序运行,最终达到最优目标的学问,是具有方法论意义的科学理论。

自 1948 年维纳发表著名的《控制论》以来,控制论经过 50 多年的发展,与其他的学科互相结合,产生了许多新的边缘学科和综合学科。这些学科不断地“分化—结合”,形成了以控制论为核心的“学科树”和“学科林”。控制论发展到今天已经取得了辉煌成就,诞生了工程控制论、生物控制论、经济控制论、社会控制论和人口控制论等一系列现代控制论的分支学科。与此同时,控制论与其他学科的界线也愈来愈模糊,理论创新的难度也越来越大,理论和实际结合还存在不少问题。

随着人类社会进入信息时代,控制论的发展又面临新的巨大挑战和重大机遇。控制论应当而且可以在信息化和现代化的建设中发挥作用,应当而且能够为网络化、集成化、协调化和智能化的实现提供方法支持。可以预见,控制论发展前途光明,仍将是高新技术的前沿和推动新技术革命的核心力量之一。

1.1.2 控制论与网络系统的结合

在信息社会里,人、机器和信息源三者共同结合组成了一种新型社会生活空间和交往空间——网络空间(Cyberspace),给控制论学科带来了许多新问题、新思想和新方法。

由计算机支持的全球网络是多维的,是人造或虚拟的真实。它是真实的,每一台计算机都是一个窗口;它是虚拟的,所看到的或听到的,既不是物质,也不是物质的表现,相反它们都是纯粹的数据或信息组成的。因此,网络空间既具有虚拟性又具有现实性,是现实和虚拟的结合。在网络空间中既有一般控制问题,更有特殊的虚拟控制问题,控制理论在网络研究领域具有巨大而全新的应用前景。

计算机网络诞生的初期,层次少,结构简单,几乎谈不上有实